



Avaliação de estudos de viabilidade econômica da pirólise de plásticos

João Vitor Lima da Mota¹ <https://orcid.org/0009-0000-2217-2549>

Alessandra da Rocha Duailibe Monteiro¹ <https://orcid.org/0000-0002-3114-4133>

Beatriz Gava Frias¹ <https://orcid.org/0009-0004-9760-0316>

¹ Universidade Federal Fluminense - UFF, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo: Com a ampla utilização dos plásticos atualmente e a gestão inadequada dos resíduos gerados, a busca por uma solução para o acúmulo causado é cada vez mais urgente. A reciclagem química por meio da pirólise vem sendo proposta como uma solução interessante, já que é capaz de converter os resíduos plásticos nos seus monômeros originais, retornando à cadeia química, propiciando uma economia circular. Embora o tema da pirólise de plástico seja abrangente na literatura, a viabilidade de implementar esse processo ainda carece de informação. O presente trabalho tem como objetivo a avaliação dos principais parâmetros de diferentes estudos da viabilidade econômica de pirólise de resíduos plásticos, por meio de uma revisão bibliográfica na literatura dos artigos que abordam o tema. Para isso, foi elaborado um detalhamento dos estudos encontrados e uma análise comparativa entre eles. Pôde-se notar que existem semelhanças entre os parâmetros e indicadores mais utilizados, como CAPEX, OPEX e VPL, além da Taxa Interna de Retorno e *Payback*, observando que, na maior parte dos casos, a capacidade da planta exerce grande influência no resultado. Verificou-se que grande parte dos estudos realizados são economicamente viáveis, indicando um resultado positivo para a implementação de plantas de pirólise de resíduos plásticos.

Palavras-chave: plástico; pirólise; viabilidade econômica.

Abstract: Nowadays, solutions are continuously claimed with the wide use of plastics and the inadequate management of its generated waste. Chemical recycling through pyrolysis has been proposed as an interesting alternative since it can convert plastic waste into its original monomers, returning to the chemical chain and providing a circular economy. Although the subject of plastic pyrolysis is comprehensive in the literature, the feasibility of implementing this process still lacks information. The present work aims to evaluate the main parameters of the different models used in the economic viability studies of plastic waste pyrolysis through a literature review of articles that address the subject. For this, a breakdown study and a comparative analysis between them was performed. It was possible to analyze that there are similarities between the most used parameters and indicators, such as CAPEX, OPEX, and NPV, in addition to the Internal Rate of Return and Payback, observing that, in most cases, the capacity of the plant has a great influence on the result. Therefore, it was

possible to verify that many of the studies are economically feasible, indicating a positive result for implementing plastic waste pyrolysis.

Keywords: plastic: pyrolysis: economic feasibility.

Como citar: MOTA, J.V.L., MONTEIRO, A.R.D., FRIAS, B.G. **Avaliação de Estudos de Viabilidade Econômica da Pirólise de Plásticos.** *Engevista*, vol. 22, n.1, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, 2024.

Autor para contato: João Vitor Mota. E-mail: joaomota@id.uff.br

Financiamento: Agradecimentos ao apoio financeiro do Fundo Brasileiro para a Biodiversidade (FUNBIO).

Conflito de interesse: Nada a declarar.

1 INTRODUÇÃO

É difícil imaginar na sociedade atual um mundo sem plásticos, porém sua produção em grande escala atrelada à elevada demanda, somente se iniciou amplamente por volta de 1950, após a Segunda Guerra Mundial (Geyer *et al.*, 2017). O sucesso dos materiais poliméricos ocorre, em grande parte, devido às suas propriedades desejáveis, tais como baixa densidade, alta durabilidade, resistência química, facilidade de ser produzido e processado, assepsia e flexibilidade, conferindo-lhes grande versatilidade e aplicação em diversos setores, incluindo as indústrias de bens de consumo, embalagens, automobilística e de construção (Bucknall, 2020; Goodship, 2007). Por conta dessas características, a produção global alcançou 400 milhões de toneladas em 2022, e com expectativa de que até 2050 esse valor ultrapasse 1 bilhão de toneladas (Zabaniotou; Vaskalis, 2023; Plasticseurope, 2023).

Como resultado dessa ampla demanda e da economia linear de seu uso, a quantidade de resíduos gerados também vem aumentando significativamente. Entretanto, a capacidade de gerenciamento adequado desses resíduos não acompanhou esse aumento, o que levou a um grande acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente, gerando impactos negativos que vem chamando atenção e preocupando a sociedade. Dessa forma, novas alternativas para a disposição desses plásticos vêm sendo desenvolvidas (Oliveira Júnior, 2016; Syamsiro *et al.*, 2014; Bucknall, 2020).

A implementação de estratégias para conter a extinção de recursos materiais e minimizar danos ao meio ambiente é fundamental para alcançar uma economia circular de plásticos, que, de maneira geral, tem como princípio manter esses materiais em seu maior valor pelo maior tempo possível dentro do ciclo produtivo (Bucknall, 2020). Sendo assim, vale destacar que a reciclagem é o método que está conquistando cada vez mais espaço como a mais promissora dentre as opções para aplicar a economia circular no mercado do plástico, minimizando suas consequências indesejáveis ao meio ambiente (Oliveira Júnior, 2016; Spinacé; Paoli, 2005). A reciclagem química por meio da pirólise vem sendo proposta como uma solução interessante, já que é capaz de converter os resíduos plásticos nos seus monômeros originais, como combustível e produtos químicos, que apresentam potencial para utilização em processos diversos, mantendo o material inorgânico inalterado, propiciando

uma economia circular (Larrain *et al.*, 2020; Oliveira Júnior, 2016; Syamsiro *et al.*, 2014; Koloski-oh *et al.*, 2021).

A avaliação de soluções potenciais para a transição para uma economia circular requer análises abrangentes. No que diz respeito às novas tecnologias, trata-se de abordar as suas implicações econômicas, considerando todos os custos relacionados à sua aquisição e operação, assim como as receitas de seus produtos (Larrain *et al.*, 2020). Embora existam muitos estudos sobre a pirólise de resíduos plásticos na literatura, esta tecnologia ainda está em desenvolvimento e, atualmente, apenas poucas plantas de demonstração ou piloto estão em operação no mundo (Jeswani *et al.*, 2021). Por isso, é necessário que sejam feitos estudos de viabilidade econômica para analisar a sua lucratividade, com objetivo de contribuir para tomadas de decisões de gestores e investidores (Oliveira, 2008).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Resíduos plásticos e reciclagem

O plástico, nome originado do grego *plastikós* (que significa “flexível e facilmente moldado”), é um material constituído por polímeros, que são macromoléculas formadas, conforme o nome indica, por muitas (poli) cadeias com uma unidade básica (mero) que se repete regularmente, ligadas por uma ligação covalente do tipo sp³ (Carneiro *et al.*, 2021; Gorni, 2003). Os monômeros possuem o carbono como seu principal componente, por isso, podem ser encontrados no álcool, madeira, carvão e no dióxido de carbono, porém os monômeros mais utilizados nos dias de hoje são originados por meio do petróleo e gás natural, já que é a rota mais barata (Gorni, 2003).

O plástico está numa trajetória de demanda ascendente na escala global nas últimas décadas, já que pode ser utilizado em diversos setores. Tal cenário crescente se fortalece quando se soma o fato de serem materiais de baixo custo, baixo peso, conferindo economia de combustível em seu transporte, e duráveis, o que, em segmentos como construção, torna-se significativamente relevante (Santos *et al.*, 2012; Siquim/EQ/UFRJ, 2003). Entretanto, em relação ao meio ambiente, se acumulam de forma cada vez mais abrupta contaminando solos, mares, oceanos e águas doces, o que é prejudicial para os ecossistemas e saúde humana e

deve ser um ponto a ser analisado, pois ações necessitam ser tomadas para solucionar estes problemas (Carneiro *et al.*, 2021).

Este panorama se torna ainda mais crítico quando se observa que grande parte das aplicações dos plásticos, em torno de 40 %, tem vida útil variando entre 0 a 3 anos, podendo ser utilizadas uma única vez antes do seu descarte (chamados plásticos de curto ciclo de vida útil), como é o caso das embalagens. Portanto, a poluição plástica se tornou um problema socioambiental urgente (PLASTIC EUROPE, 2022; UNEP, 2024), com cerca de 4 a 12 milhões de toneladas métricas de resíduos plásticos detectados no ambiente oceânico, somente em 2010, e com projeções de 300 milhões de toneladas métricas de poluição plástica no oceano até 2030 (Larrain *et al.*, 2020; Geyer *et al.*, 2017). Estes resíduos formam piscinas de lixo como uma grande mancha, deixando a saúde dos animais aquáticos em risco, podendo causar emaranhamento físico ou ingestão inapropriada, sendo verificadas mais de 240 espécies de animais afetadas por conta da ingestão de plásticos, que provoca danos internos, bloqueios no sistema digestivo e, em casos extremos, óbito (Carneiro *et al.*, 2021; Kunwar *et al.*, 2016).

O cenário de fim de vida dos resíduos poliméricos ainda está distante do ideal, com grande parte sendo direcionada para aterros sanitários, como apresentado na Figura 1. Estima-se que, desde 1950, já foram descartados 6,3 bilhões de toneladas de resíduos plásticos, e, desses, 4,9 bilhões de toneladas estão acumuladas nos aterros sanitários ou na natureza e menos que 5% do total foi reciclado (Pesquisa Fapesp, 2019).

A reciclagem pode ser vista como um processo que possibilita prolongar a vida útil de um material, além da sua aplicação inicial, promovendo a transformação do material original em novos produtos (Pinto *et al.*, 2012; Pessôa, 2018). A reciclagem permite que haja uma diminuição, tanto do acúmulo de resíduos plásticos, quanto da necessidade da utilização de material virgem para produção dos plásticos, contribuindo em ambos os casos para a redução das emissões de dióxido de carbono e do consumo de energia utilizado por esses processos de produção (Pinto *et al.*, 2012; Duailibe *et al.*, 2019). A Figura 2 demonstra um fluxo em relação ao ciclo de vida do plástico e o momento em que as diferentes formas de reciclagem podem ser utilizadas.

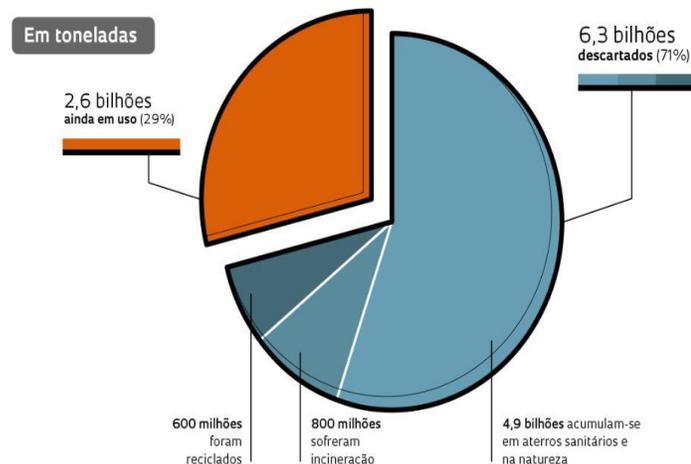


Figura 1. Destinação dos resíduos plásticos desde 1950.

Fonte: Pesquisa Fapesp (2019).

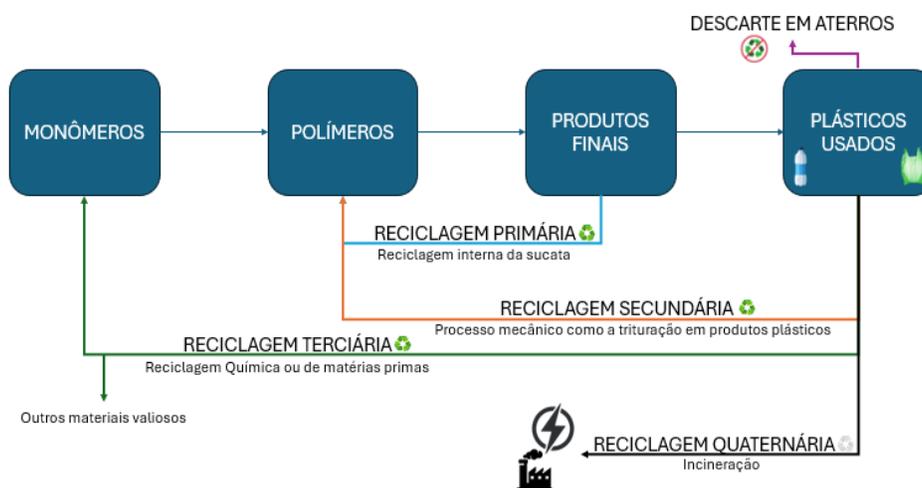


Figura 2. Tipos de reciclagem de resíduo plástico.

Fonte: adaptado de Okan *et al.* (2019).

A reciclagem primária, ou re-extrusão, consiste na reinserção de sucatas plásticas limpas e sem contaminação, diretamente no processo produtivo com o intuito de produzir materiais semelhantes aos originais (Oliveira Júnior, 2016). Ela é chamada de reciclagem pré-consumo, pois são utilizados polímeros virgens, não sendo possível ser feita depois do consumo (Al-Salem *et al.*, 2009). A reciclagem secundária, ou mecânica, corresponde ao reprocessamento dos resíduos pós-consumo em novos produtos de qualidade inferior ao

material original através de etapas mecânicas, como trituração, separação, lavagem, dentre outras. A reciclagem terciária, ou química, acontece por meio de processos de despolimerização dos resíduos poliméricos, os convertendo de volta a monômeros e outras substâncias de baixa massa molar, os quais podem depois ser utilizados em outros processos como processamento, polimerização, utilização e industrialização (Oliveira Júnior, 2016; Zanin; Mancini, 2009). Ela oferece vantagens em relação ao conceito de um ciclo infinito e não restrição de material, ou seja, é possível obter materiais idênticos ao virgem a partir de resíduos plásticos ao invés de recursos fósseis convencionais (Monteiro, 2018). Na reciclagem quaternária, ou energética, acontece a queima dos resíduos, por meio de uma incineração controlada para a recuperação do conteúdo energético, por meio de vapor, calor ou eletricidade, sendo um método que está em crescimento nos últimos anos (Oliveira, 2012; Al-Salem *et al.*, 2010).

A reciclagem química por meio da pirólise vem se destacando como uma técnica interessante e promissora para tratar resíduos plásticos pós-consumo. A pirólise é um processo em que acontece uma decomposição térmica da substância, devido a um aquecimento na ausência de oxigênio, e em atmosfera inerte, com a quebra das ligações químicas das cadeias orgânicas, por ser feita abaixo do nível estequiométrico de combustão (Fivga; Dimitriou, 2018; Pessôa, 2018; Oliveira Júnior, 2016). Como a pirólise é uma reação endotérmica, é necessário fornecer calor para o sistema, podendo ser de forma direta usando o oxigênio, ou indireta, por meio da troca de calor (Spinacé; Paoli, 2005). Na Figura 3, é apresentada a esquematização de uma pirólise de resíduos plásticos, em que são obtidos produtos gasosos, condensados e sólidos. Vale destacar que o estudo de viabilidade econômica desse processo tem como foco o reaproveitamento desses produtos obtidos na pirólise como novas matérias primas de outros processos.

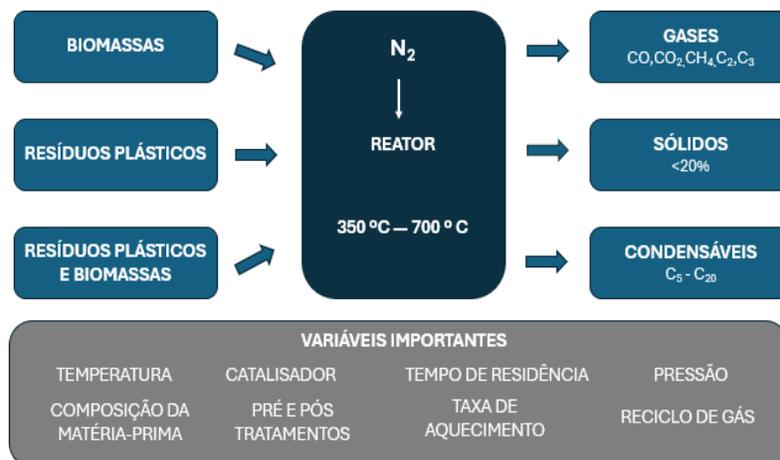


Figura 3. Pirólise de resíduos plásticos.

Fonte: adaptado de Lopez *et al.* (2017).

2.2 O estudo da viabilidade econômica

A análise de viabilidade econômica tem por objetivo avaliar os benefícios projetados em um investimento, comparando-os com os custos e investimentos associados, para poder, assim, determinar se é viável implementar o projeto (Zago *et al.*, 2009). A partir dos cálculos e interpretações dos resultados do estudo torna-se possível ter uma visão melhor da situação e tomar uma decisão de investimento com base em dados concretos (Diniz *et al.*, 2016).

É realizada uma projeção dos custos de produção, onde são determinados os custos operacionais e os custos de capital. Os custos operacionais são determinados a partir dos custos de matéria-prima, mão de obra, despesas gerais, royalties e manutenção. Na maior parte dos estudos, os custos operacionais são divididos em duas categorias: fixos e variáveis, para serem estimados separadamente, sendo de extrema importância a consideração da taxa de inflação durante o tempo. Os custos de capital são definidos com objetivo de produzir com preços competitivos e com maior taxa de retorno do investimento possível ao mesmo tempo (Finnerty, 2007).

A localização do empreendimento é um fator essencial para a determinação da viabilidade econômica, já que determinam os valores de mão de obra, matéria-prima, investimentos, impostos, dentre outros. Essa análise detalhada é essencial para verificar a viabilidade de

investimento, já que permite identificar a rentabilidade de um projeto (Strachoski, 2011). É de extrema importância que esses resultados possam ser medidos com alto nível de eficiência e eficácia, e para isso, são utilizados indicadores. Dentre todos os indicadores existentes, os mais usados são: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), despesas de capital (CAPEX, *capital expenditure*), despesas operacionais (OPEX, *operational expenditure*) e *Payback* (Diniz *et al.*, 2016).

Portanto, em um estudo de viabilidade econômica de um produto, processo ou empreendimento são avaliados os custos e indicadores relevantes. Para este fim, precisam ser levantados os parâmetros operacionais que envolvem cada custo e indicador. Dessa forma, foram avaliados os estudos presentes na literatura científica relacionados a avaliação da viabilidade econômica da pirólise de resíduos plásticos.

3. METODOLOGIA

Para a elaboração deste trabalho foi realizada uma busca bibliográfica na literatura, utilizando a base de dados Google Acadêmico com as palavras “pyrolysis AND plastic” combinadas no título conduzido até junho de 2023, sendo encontrados 794 resultados. Porém, ao incluir as palavras “economic OR feasibility”, também no título, foram retornados somente 31 resultados, sendo apenas um desses datado de antes de 2018, indicando o aspecto atual deste assunto.

O foco do trabalho é encontrar os parâmetros utilizados nos estudos de viabilidade econômica de pirólise de resíduos plásticos, as cargas de entrada, as condições dos processos, e, finalmente, os indicadores econômicos e as considerações feitas para estudo de viabilidade econômica.

Portanto, para uma avaliação criteriosa e comparativa foram levantadas as metodologias de cálculo utilizadas (se foi utilizada alguma), capacidade da planta, carga de entrada, produtos obtidos, custos considerados e indicadores avaliados. Para a catalogação dos resultados das análises realizadas nos documentos pesquisados foi elaborada uma planilha auxiliar criada no Microsoft® Excel® 2013, permitindo a organização dos dados obtidos em cada documento e a comparação dos dados entre os trabalhos encontrados. A fim de ilustrar os

artigos foram selecionados um estudo para cada ano desde 2018, além do estudo de Westerhout e colaboradores de 1998.

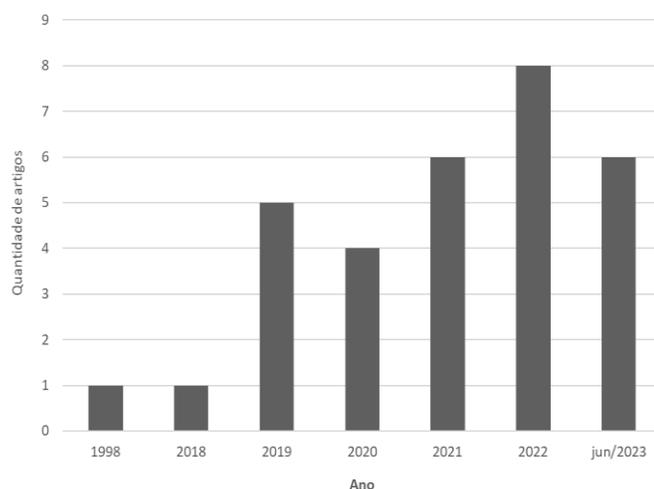


Figura 4. Resultados da busca bibliográfica do tema no Google Acadêmico.

Fonte: o autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pode-se observar que uma metodologia utilizada para avaliação econômica da pirólise de resíduos plásticos é a TEA (avaliação tecno-econômica ou *techno-economic assessment*). Ela é uma metodologia utilizada para determinar a viabilidade econômica de um processo, com o objetivo de apontar a solução de maior custo-benefício por meio de uma análise tanto de investimento quanto de performance (Kantor *et al.*, 2010), calculando a rentabilidade de um projeto, por meio do VPL, com a projeção de receita e custo (Larrain *et al.*, 2020). A TEA pode ser usada tanto para um projeto que ainda vai iniciar, quanto para um que já foi implementado, mas que sofrerá expansão ou algumas alterações. Essa metodologia é dividida em 4 (quatro) etapas: 1) estudo de mercado; 2) diagrama de fluxo de processos (PFD – *Process Flow Diagram*) e balanço de massa e energia; 3) análise econômica e 4) análise de risco / análise de sensibilidade (Fang; Smith Jr., 2015). As Tabelas 1 e 2 apresentam os artigos que utilizaram a metodologia TEA em sua análise e as etapas do TEA consideradas nestes estudos, respectivamente. Foram avaliadas as cargas utilizadas na pirólise dos estudos avaliados, como apresentado na Tabela 3. Pode-se perceber, em sua maioria, poliolefinas (PP, PE e PS), dada suas aplicações de curto ciclo de vida, como no setor de embalagens.

Também foram observadas as condições de processo, os reatores utilizados e os rendimentos das conversões para fins comparativos.

Tabela 1: Artigos que utilizaram a metodologia TEA.

Larrain <i>et al.</i> (2020)	X
Fivga e Dimitriou (2018)	X
Almohamadi <i>et al.</i> (2021)	X
Zein <i>et al.</i> (2022)	
Ghodrat <i>et al.</i> (2019)	
Westerhout <i>et al.</i> (1998)	
Park <i>et al.</i> (2023)	
Gracida-Alvarez <i>et al.</i> (2019)	
Sahu <i>et al.</i> (2012)	X
Lubongo <i>et al.</i> (2022)	X
Yadav <i>et al.</i> (2022)	X
Zabaniotou <i>et al.</i> (2023)	X
Kulas <i>et al.</i> (2023)	X

Tabela 2: Etapas da metodologia TEA que foram utilizadas pelos autores.

	Estudo de Mercado	Diagrama de Fluxo de Processos e Balanço de Massa e Energia	Avaliação Econômica	Análise de Risco
Larrain <i>et al.</i> (2020)	X	X	X	X
Fivga e Dimitriou (2018)		X	X	X
Almohamadi <i>et al.</i> (2021)		X	X	X
Sahu <i>et al.</i> (2012)		X	X	X
Lubongo <i>et al.</i> (2022)	X	X	X	X
Yadav <i>et al.</i> (2022)		X	X	X
Zabaniotou <i>et al.</i> (2023)	X	X	X	X
Kulas <i>et al.</i> (2023)	X	X	X	X

Tabela 3: Cargas poliméricas consideradas nos estudos avaliados.

	PS	PP	PE	PET	PEAD	PEBD	PVC
Larrain et al. (2020)		X				X	
Fivga e Dimitriou (2018)	X	X					
Almohamadi et al. (2021)	40% m/m	20% m/m	20% m/m	20% m/m			
Zein et al. (2022)						X	
Ghodrat et al. (2019)	13% m/m	8% m/m	-	5,5% m/m	31% m/m	31% m/m	11,5% m/m

O principal reator utilizado foi de leito fluidizado, à pressão atmosférica, com obtenção de combustíveis com conversões de até 92% de hidrocarbonetos C1 a C4 (Zein *et al.*, 2022; Fivga e Dimitriou, 2018). também foram obtidas frações gasosas (20% a 40% em massa) (Larrain *et al.*, 2020). Com relação aos indicadores econômicos, CAPEX, OPEX e VPL, as Tabelas 4 a 6 apresentam os resultados obtidos para os estudos avaliados para diferentes capacidades das plantas.

Tabela 4: CAPEX dos estudos avaliados.

	Capacidade da planta	Parâmetros	CAPEX (M)	CAPEX (MR\$)	Maior custo
Fivga e Dimitriou (2018)	100 kg/h	Instalação de equipamentos; Custos indiretos; Impostos; Capital de giro.	£0,99	6,02	N/A
	1.000 kg/h		£3,06	18,63	
	10.000 kg/h		£9,35	56,94	
	100.000 kg/h		£56,77	345,72	
Almohamadi et al. (2021)	41.666 kg/h	Capital fixo (Instalação de equipamentos; Terreno; Desenvolvimento do site; Custos indiretos e contingências); Capital de giro.	£118,00	567,58	Equipamento de pirólise e hidroxidação
Zein et al. (2022)	100 kg/h	Capital fixo (Equipamentos; Terreno; Construção; Patente; Licenças; Subsídio de contingência).	£1,8	10,96	Reator de pirólise

Tabela 5: OPEX dos estudos avaliados.

	Parâmetros	OPEX (M)	OPEX (MR\$)	Maior custo
Larrain et al. (2020)	Equipamentos e infraestrutura; Subsídios de contingência; Gerenciamento de projeto.	N/A	N/A	N/A
		N/A	N/A	
Fivga e Dimitriou (2018)	Matéria-prima; Serviços Públicos; Mão de obra; Manutenção.	£0,42	2,25	N/A
		£1,20	7,30	
		£2,20	13,39	
		£9,90	60,29	
Almohamadi et al. (2021)	Matéria-prima; Catalisador; Serviços Públicos; Tratamento do lixo; Manutenção e despesas; Distribuição e venda; Depreciação do capital; Imposto de renda; ROI.	\$27,00	129,87	Distribuição e venda
Zein et al. (2022)	Matéria-prima; Serviços públicos; Empacotamento e venda; Manutenção; Mão de obra; Supervisão; Laboratório; Despesas gerais da planta; Encargos; Seguro; Taxas locais; Royalties; Venda; Pesquisa e desenvolvimento; Despesas gerais.	£1,5	9,13	Mão de obra

Tabela 6: VPL dos estudos avaliados.

	VPL	VPL (R\$)
Larrain et al. (2020)	565.000 euros	$VPL = \sum \frac{Receita - custos\ oper.}{(1+d)^j} - custo\ de\ invest.$
	15	
Fivga e Dimitriou (2018)	aprox. -1 milhão e 300 mil libras	-7.917.000
	aprox. 12 milhões de libras	73.080.000
	aprox. 20 milhões de libras	121.800.000
	2 bilhões de libras	12.180.000.000.000
Zein et al. (2022)	-148 mil libras	-779.960
	733 mil libras	3.862.910

É possível analisar que embora existam algumas variáveis diferentes avaliadas, a instalação de equipamentos, serviços públicos e capital de giro são essenciais para o CAPEX. O custo do reator, principalmente da pirólise, costuma ser o que possui mais alto valor de investimento inicial, talvez por conta de especificidades do processo ou pela presença do forno de aquecimento a temperaturas elevadas, o que acaba tornando a viabilidade econômica da pirólise mais difícil. Para o OPEX também foram observados parâmetros em comum, como matéria prima, manutenção, serviços públicos e mão de obra, sendo a última a com maior impacto nos valores finais. Um ponto importante a se destacar, é que embora a matéria-prima esteja sendo considerada na conta de OPEX, a maior parte dos autores não considera esse custo, já que levam em conta que serão fornecidos sem custo, o que se torna um pouco irrealista, já que ele pode ter um papel fundamental no resultado, como avaliado na análise de sensibilidade realizada por Fivga e Dimitriou (2018). Dessa maneira, os processos foram avaliados como economicamente viáveis ou não, como pode-se notar na Tabela 7.

Tabela 7: Viabilidade econômica dos estudos avaliados.

	Economicamente viável?	Considera custo matéria-prima?
Larrain et al. (2020)	Sim	Sim
	Sim	Sim
Fivga e Dimitriou (2018)	Não	Não
	Sim	Não
	Sim	Não
	Sim	Não
Almohamadi et al. (2021)	N/A	Não
Zein et al. (2022)	Não	Não
	Sim	Não
Westerhout et al. (1998)	Sim	Não
Park et al. (2023)	Sim	Sim
Gracida-Alvarez et al. (2019)	Sim	Sim

Dessa forma, é possível observar que a maior parte dos estudos se configuraram economicamente viáveis, porém o estudo de Fivga e Dimitriou (2018) e Zein *et al.* (2022) que consideraram 100 kg/h não foram. No caso de Zein *et al.* (2022), é possível perceber que, quando o preço do barril é £300, ele é viável, porém esse preço é muito superfaturado, então, pode-se dizer que, em condições normais, não vai ser economicamente viável. Isso reflete também o que a maior parte das análises de sensibilidade destacaram que a capacidade da planta tem uma influência muito grande no resultado.

Além disso, um ponto importante a ressaltar é que o local em que a análise é feita pode ter grande interferência, já que os custos atrelados à compra e instalação de equipamentos, mão de obra, matéria-prima, por exemplo, está sempre atrelada a esse fator. Portanto, uma planta pode ser inviável em determinadas regiões, porém, apresentar viabilidade em outras.

4 CONCLUSÕES

Neste artigo foi realizada uma avaliação dos estudos de viabilidade econômica da pirólise de resíduo plástico, visto que esse é um assunto de extrema importância para a possibilidade de implementação da reciclagem química por meio da pirólise, a qual está totalmente inserida no contexto da economia circular. Mediante busca de artigos científicos na literatura, os trabalhos encontrados foram avaliados e comparados entre si com relação aos seguintes parâmetros: i) etapas consideradas no estudo; ii) indicadores econômicos utilizados e iii) parâmetros da planta considerados. Em relação a metodologia, oito artigos (Larrain *et al.*, 2020, Fivga e Dimitrou, 2018, Almohamadi *et al.*, 2021, Sahu *et al.*, 2012, Lubongo *et al.*, 2022, Yadav, 2022, Zabaniotou, 2023 e Kulas, 2023) utilizaram a TEA (Avaliação tecno econômica), que contempla etapas de análise de mercado, elaboração do diagrama de fluxo de processos e balanços de massa e energia, avaliação econômica e análise de risco, sendo que apenas Larrain *et al.* (2020), Lubongo *et al.* (2022), Zabaniotou *et al.* (2023) e Kulas (2023) realizaram a etapa de análise de mercado.

Pôde-se observar, em todos os trabalhos, que as cargas utilizadas se caracterizavam principalmente por poliolefinas (PP, PE, PS), que representam os principais polímeros encontrados em resíduos sólidos. Os indicadores mais utilizados em todos os estudos foram VPL, TIR, *Payback period*, CAPEX e OPEX. Além disso, foi possível verificar que embora

a matéria-prima esteja sendo considerada na conta do OPEX, a maior parte dos autores não considera esse custo, já que levam em conta que serão fornecidos sem custo, o que se torna um pouco irrealista, já que ele pode ter um papel fundamental no resultado. Ainda em relação ao OPEX a mão de obra reflete uma grande parcela do resultado, principalmente por requerer uma mão de obra muitas vezes especializada, tanto que quando considerado o aumento da capacidade da planta contribui para a viabilidade econômica, esse custo fica mais diluído. Em relação ao CAPEX, pôde-se notar que a instalação de equipamentos, serviços público e capital de giro são essenciais, sendo o custo do reator, principalmente da pirólise, o que apresentou maior valor de investimento inicial, talvez por conta de especificidades do processo ou pela presença do forno de aquecimento a temperaturas elevadas, o que acaba tornando a viabilidade econômica da pirólise mais difícil. Por fim, a escala na planta constitui um fator extremamente significativo, de forma que plantas com menores capacidades resultaram em projetos economicamente inviáveis.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao apoio financeiro do Fundo Brasileiro para a Biodiversidade (FUNBIO), e à Universidade Federal Fluminense (UFF).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMOHAMADI, H.; ALAMOUDI, M.; AHMED, U.; SHAMSUDDIN, R.; SMITH, K. **Producing hydrocarbon fuel from the plastic waste: Techno-economic analysis**. *Korean J. Chem. Eng.*, v. 38(11), p. 2208-2216. 2021.
- AL-SALEM, S.M.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J. **Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review**. *Waste Management* v. 29, p. 2625–2643. 2009.
- AL-SALEM, S.M.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J. **The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and Chemicals**. *Progress in Energy and Combustion Science* v. 36, p. 103–129. 2010.
- BUCKNALL, D. G. **Plastics as a materials system in a circular economy**. *Philosophical Transactions A* v. 378: 20190268. 2020.
- CARNEIRO, T. M. Q. A.; SILVA, L. A.; GUENTHER, M. **A poluição por plásticos e a educação ambiental como ferramenta de sensibilização**. *Revista brasileira de educação ambiental*, São Paulo, v. 16, No 6, p. 285-300. 2021.
- DINIZ, J. P. A.; SOUZA, C. A.; DALFIOR, V. A. O. **Análise da viabilidade econômico-financeira dos projetos da microempresa Alfa**. XIII Simpósio de excelência em Gestão e Tecnologia. 2016.
- DUAILIBE, A.; DELGADO, J. J. S.; PINTO, J. C. **Reciclagem Química de Resíduos Plásticos: Tecnologias e Impactos** - 1. ed. - Rio de Janeiro: E-Papers, 360 p. ISBN 978-85-7650-588-4, 2019.

- FANG, Z.; SMITH Jr. R.L.; Qi, X. **Biofuels and Biorefineries 4 - Production of Biofuels and Chemicals with Ultrasound**. Springer Dordrecht Heidelberg New York London. 2015
- FINNERTY, J. D. **Project Financing: Asset-Based Financial Engineering**. 2ª edição 476 p. John Wiley & Sons. 2007.
- FIVGA, A.; DIMITRIOU, I. **Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment**. *Energy* v.149, p. 865e874. 2018.
- GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. **Supplementary Materials for Production, use, and fate of all plastics ever made**. *Science Advances*, v. 3, e1700782. 2017.
- GHODRAT M.; ALONSO J.A.; HAGARE D.; YANG R.; SAMLI B. **Economic feasibility of energy recovery from waste plastic using pyrolysis technology: an Australian perspective**. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019
- GOODSHIP, V. **Plastic recycling**. *Science Progress*, v. 90(4), p. 245–268. 2007.
- GORNÍ, A.A. **Introdução aos Plásticos**. Polímeros Editor Técnico, Revista Plástico Industrial. 2003.
- GRACIDA-ALVAREZ, U.R.; WINJOBI, O.; SACRAMENTO-RIVERO, J.C.; SHONNARD, D.R. **System Analyses of High-Value Chemicals and Fuels from a Waste High-Density Polyethylene Refinery**. Part 1: Conceptual Design and Techno-Economic Assessment. 2019.
- JESWANI, H.; KRÜGER, C.; RUSS, M.; HORLACHER, M.; ANTONY, F.; HANN, S.; AZAPAGIC, A. **Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery**. *Science of the Total Environment*, v. 769 144483. 2021.
- KANTOR, M.; WAJDA, K.; LANNOO, B.; CASIER, K.; VERBRUGGE, S.; PICKAVET, M.; WOSINSKA, L.; CHEN, J.; MITCSENKOV, A. **General Framework for Techno-Economic Analysis of Next Generation Access Networks**. 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2010.
- KOSLOSKI-OH, S. C.; WOOD, Z. A.; MANJARREZ, Y.; DE LOS RIOS, J. P.; FIESER, M. E. **Catalytic methods for chemical recycling or upcycling of comercial polymeres**. *Materials Horizons*, v. 8 p. 1084. 2021.
- KULAS, D. G.; ZOLGHADR, A.; CHAUDHARI, U. S.; SHONNARD, D. R. **Economic and environmental analysis of plastics pyrolysis after secondary sortation of mixed plastic waste**. *Journal of Cleaner Production*, v. 384 135542. 2023.
- KUNWAR, B.; CHENG, H. N.; CHANDRASHEKARAN, S. R.; SHARMA, B. K. **Plastics to fuel: a review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v. 54 p. 421–428. 2016.
- LARRAIN, M.; VAN PASSEL, S.; THOMASSEN, G., KRESOVIC, U.; ALDERWEIRELDT, N.; MOERMAN, E.; BILLEN, P. **Economic performance of pyrolysis of mixed plastic waste: Open-loop versus closed-loop recycling**. *Journal of Cleaner Production*, v. 270 122442. 2020.
- LOPEZ, Gartzén; ARTETXE, Maite; AMUTIO, Maider; BILBAO, Javier; OLAZAR, Martín. **Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 73, p. 346-368, 2017.
- LUBONGO C.; CNGDON T.; MCWHINNIE J.; ALEXANDRIDIS P. **Economic feasibility of plastic waste conversion to fuel using pyrolysis**. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* v. 27 100683. 2022.

- MONTEIRO, A. R. D. **Contribuição da reciclagem química de resíduos plásticos para o desenvolvimento sustentável.** Tese de Doutorado em Engenharia Química, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2018.
- OLIVEIRA JÚNIOR, D. L. **Pirólise de resíduos plásticos visando à obtenção de produtos de alto valor agregado.** *Dissertação Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS).* 2016.
- OLIVEIRA, M. C. B. R. **Gestão de resíduos plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no Brasil.** Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012.
- OLIVEIRA, M.H.F. **A avaliação econômico-financeira de investimentos sob condição de incerteza: uma comparação entre o método de Monte Carlo e o VPL Fuzzy.** *Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, USP.* 2008.
- OKAN, Meltem; AYDIN, Halil Murat; BARSBAY, Murat. **Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review.** *Journal of Environmental Management*, v. 236, p. 116-143, 2019.
- PARK, H.; KIM, K.; YU, M.; YUN, Z.; LEE, S. **Economic analysis of the circular economy based on waste plastic pyrolysis oil: a case of the university campus.** *Environment, Development and Sustainability.* March 2023.
- PINTO, J.C.; MAGRINI, A.; MELO, C.K.; CASTOR JR, C.A.; GAIOTO, C.C.; SANTOS, D.P.; BORGES, G.; ROSA, I.S.; DELGADO, J. J. S.; SOUZA, M. N.; OLIVEIRA, M. C. B. R.; SOUZA, P. N.; MELO JR, P. A.; ADERNI, R.; VASCONCELOS, S. M. R. **Impactos Ambientais Causados pelos Plásticos: Uma discussão abrangente sobre os mitos e os dados científicos.** 2a edição E-Papers. 2012.
- PESSÔA, V. A. F. **Reciclagem e reutilização de Materiais poliméricos plásticos.** Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia de Materiais – Escola Politécnica UFRJ, Rio de Janeiro. 2018.
- PLASTICSEUROPE; FEIQUE. **Chemical Recycling in Spain: Fostering a Circular Future.** *PlasticsEurope.* Annual report, 2022.
- PLASTICS EUROPE. **The fast facts 2023.** 2023.
- SAHU J. N.; MAHALIK K.K.; NAM H. K.; LING T. Y.; WOON T.S.; RHAMAN M. S. B. A.; MOHANTY Y. K.; JAYAKUMAR N. S.; JAMUAR S. S. **Feasibility Study for Catalytic Cracking of Waste Plastic to Produce Fuel Oil with Reference to Malaysia and Simulation using ASPEN Plus.** *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 1.00, no.00. 2012.
- SANTOS, A. S. F.; FREIRE, F. H. O.; COSTA, B. L. N. **Sacolas Plásticas: Destinações Sustentáveis e Alternativas de Substituição.** *Polímeros*, v. 22, n. 3, p. 228-237, 2012.
- SIQUIM/EQ/UFRJ - **Prospecção tecnológica da cadeia produtiva de transformados plásticos -.** Rio de Janeiro, 2003.
- SPINACÉ, M.A.S.; PAOLI, M.A. **A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros.** *Química Nova*, v. 28, No. 1, p. 65-72, 2005.
- STRACHOSKI, P. **Análise de viabilidade econômica de um projeto de Investimento em uma indústria de artefatos de cimentos.** Dissertação Curso de Ciências Contábeis da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma. 2011.

SYAMSIROA, M.; SAPTOADIB, H.; NORSUJANTOB, T.; NOVIASRIA, P.; CHENG, S.; ALIMUDDINC, Z.; YOSHIKAWAA, K. **Fuel Oil Production from Municipal Plastic Wastes in Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Reactors** *Energy Procedia*, v. 47 p. 180-188, 2014.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Plastic Pollution**. Nairobi: UNEP, 2024. 120 p. (Environmental Reports; v. 15).

VASCONCELOS Y. Planeta Plástico. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/planeta-plastico/>>. Acesso em: 5 maio 2023

WESTERHOUT, R. W. J.; VAN KONINGSBRUGGEN, M. P.; VAN DER HAM, A. G. J.; KUIPERS, J. A. M.; Van Swaaij, W. P. M. **Techno-economic evaluation of high-temperature pyrolysis processes for mixed plastic waste**. *Trans IChemE*, v. 76, Part A, March 1998.

YADAV G.; SINGH A.; NICHOLSON S. R.; BECKHAM G. T. **Techno-Economic Analysis and Life Cycle Assessment for Pyrolysis of Mixed Waste Plastics**. *Bottle changing the way we recycle*. 2022.

ZABANIOTOU, A.; VASKALIS, I. **Economic Assessment of Polypropylene Waste (PP) Pyrolysis in Circular Economy and Industrial Symbiosis**. *Energies*, v. 16, p.593, 2023.

ZAGO, C. A.; WEISE, A. D.; HORNBURG, R. A. **A importância do estudo de viabilidade econômica de projetos nas organizações contemporâneas**. VI CONVIBRA – Congresso Virtual Brasileiro de Administração, 2009.

ZANIN, M.; MANCINI, S. D. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. 144p. EdUFSCar, São Carlos. 2009.

ZEIN, S. H.; GROGAN, C. T.; YANSANEH, O. Y.; PUTRANTO, A. **Pyrolysis of high-density polyethylene waste plastic to liquid fuels—Modelling and economic analysis**. *Processes*, v. 10, p.1503, 2022.

Contribuição dos autores: JVLM: conceituação, redação; BG: redação, análise formal, metodologia; ARDM: supervisão, metodologia, redação

Editores: Bruno Campos Pedroza, Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro.